

大跨、高层结构动力弹塑性和倒塌分析(I): 原理、MSC. MARC 子程序开发与验证*

柳国环^{1,2}, 陆新征^{1,2}, 李 敏³

(1 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 3 大连海洋大学海洋与土木工程学院, 大连 116023)

[摘要] 基于钢和混凝土静态、动态本构模型和纤维梁基本原理, 开发了直接能够与 MSC. MARC 主程序保持数据相互调用的子程序(包括材料应变率效应、被动控制、主动控制与单元生死判断)。主要涉及到材料的应变率效应, 该子程序不限于只考虑静态本构模型, 还考虑了动态本构模型以进一步考虑结构在动力作用下应变率因素对结构反应的影响, 可结合单元生死子程序用于结构在动力作用下的弹塑性和倒塌分析。最后, 将编制的应变率子程序应用于钢筋混凝土构件的弹塑性分析, 并与已有试验结果对比, 说明了该子程序的可靠性和准确性, 同时也认为有必要考虑应变率因素对结构反应的影响。

[关键词] 弹塑性; 损伤滞回本构; 应变率效应; 纤维梁; MSC. MARC; 倒塌

中图分类号: TU973. 2, TP319 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2014)04-0082-06

Dynamic elastic-plasticity and collapse analysis for large-span and high-rise structure (I): theory, development and verification of MSC. MARC subroutine

Liu Guohuan^{1,2}, Lu Xinzhen^{1,2}, Li Min³

(1 Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3 School of Marine and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: On the basis of the principle of fiber beam model and the static, dynamic constitutive models of steel and concrete, the subroutine, which is in compliance with MSC. MARC user guide, was coded and developed covering the effect of material strain-rate, passive control, active control and birth-death judgment of elements. The content focused on the effect of material strain rate effect. The developed subroutine includes the static stress-strain relationships well as the dynamic stress-strain relationships to consider the influence of strain-rate effect on structural dynamic response. Combined with birth-death subroutine, structural elastic-plastic and collapse analysis can be conducted. At last, the developed subroutine was used to simulate the elastic-plastic analysis of reinforced concrete members and the simulation results were compared with experiment results. The analysis results show that the subroutine developed is verified to be reliable and accurate, and further indicate that it is necessary to consider the influence of strain-rate effect on the structural response.

Keywords: elastic-plastic; damage hysteretic constitutive relationship; strain-rate effect; fiber beam; MSC. MARC; collapse

0 前言

土木工程领域中的大跨和超高层结构一般属于超限结构, 根据相关规范要求, 结构在动力荷载作用下(例如地震)的反应需要专门计算, 尤其是动力弹塑性甚至倒塌行为, 进而根据计算结果分析结构是否符合相关规范和(或)规程的要求。目前, 结构体系的动力弹塑性分析所采用的材料模型大多为静态本构模型, 而静态本构模型是基于静态或低周反复荷载作用的前提下得到的数学模型, 未能体现出材料属性在动力荷载作用下的应变率效应(宏观上表现为外界荷载作用的速率效应)。

本文开发了直接能够与 MSC. MARC 主程序保

持数据相互调用的子程序。该子程序不限于只考虑静态本构模型, 还考虑了动态本构模型, 从而可分析结构在动力荷载作用下应变率因素对结构反应的影响。将该子程序应用于钢筋混凝土构件的模拟分析, 并与试验结果作比较。

1 材料静态本构

1.1 钢材本构关系与滞回规则

结构常用到的钢材(例如普通钢筋和型钢)的本构关系如图 1 所示。由于这些材料的类型不同,

* 中国博士后科学基金(2011M500332)。

作者简介: 柳国环, 博士, 现为天津大学副教授, Email: carecivil@sina.com。

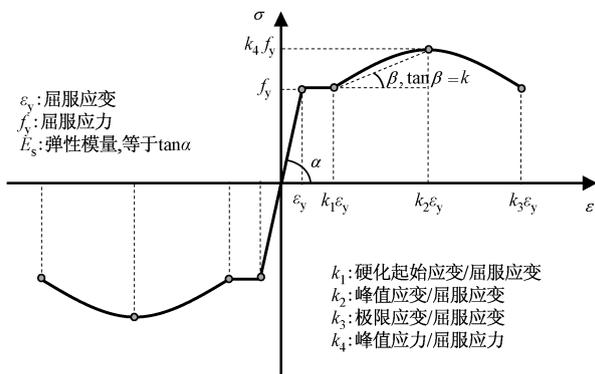
图 1(a)中所描述骨架曲线形状的特征参数 k_1, k_2, k_3 和 k_4 的取值会有所区别,相应的具体取值根据与建议以及骨架曲线表达式见文献[1]~[3],在此不再赘述。对于如图 1(b)所示的滞回曲线,相应的滞回规则如式(1)所示^[2],相关参数的物理意义如图 1(b)所示。

$$\sigma_s = [E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_a) + \sigma_a] - \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a}\right)^p [E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_a) - (\sigma_b - \sigma_a)] \quad (1)$$

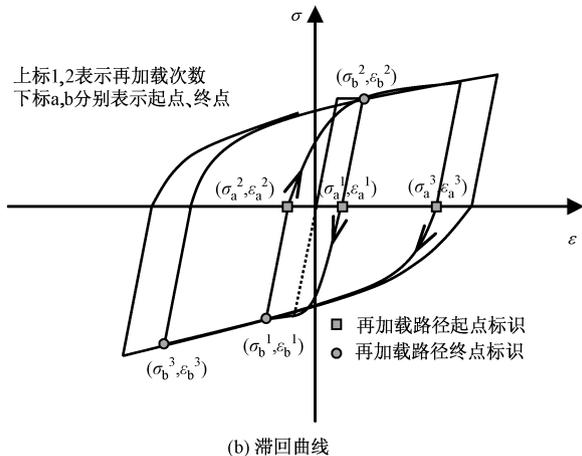
其中:

$$p = \frac{E_s(1 - k/E_s)(\varepsilon_b - \varepsilon_a)}{E_s(\varepsilon_b - \varepsilon_a) - (\sigma_b - \sigma_a)}$$

式中: σ_s 和 ε_s 为滞回曲线函数的因变量(应力)和自变量(应变); k 为等效硬化斜率,一般取为峰值强度和屈服强度两点所确定直线的斜率,见图 1(a); ε_a 和 σ_a 为卸载后再加载路径起点的应变和应力,一般取为滞回曲线与横坐标的交点,这时 $\sigma_a = 0$; ε_b 和 σ_b 分别为卸载后再加载路径终点的应变和应力,如果再加载方向的钢筋在加载历史进程中尚未发生过屈服,则 ε_b 和 σ_b 取钢筋初始屈服点的应变和应力;如果再加载方向的钢筋曾经有过屈服,则取该加载方向钢筋历史进程中的最大应变和应力。



(a) 骨架曲线



(b) 滞回曲线

图 1 钢材本构的骨架和滞回曲线示意图

1.2 混凝土本构关系与滞回规则

对于混凝土材料,其骨架曲线在低周反复荷载作用下的表现比较稳定,且与在单调荷载作用下的表现有很好的 consistency。但是,由于混凝土材料自身的特性与组成相对复杂等原因,在低周反复荷载作用下的滞回曲线的表现与钢材相比更难以被准确量化。例如,由于加载过程中混凝土局部会发生裂纹等损伤现象,而且损伤会逐渐积累,这就会直接导致混凝土随后表现出来的刚度逐渐减小,即刚度退化。目前文献记载中,描述混凝土滞回曲线的规则颇为多见。图 2 为混凝土反复荷载作用下滞回曲线示意图,图中 σ 与 ε 分别为应力和应变,下标 un, s 和 un, e 分别表示卸载始点和终点,下标 l, m 表示加载路径中的拐点,上标 ij 中的 i 和 j 表示第 i 次由骨架曲线卸载后第 j 次加载或卸载次数。

(1) 多次反复荷载作用下的卸载规则

为能够体现残余应变随加卸载次数增加而逐渐累计增大以及卸载刚度的逐渐退化,依据文献[2]和文献[3],按照下式计算:

$$\varepsilon_r^i = \varepsilon_{un,s}^{il} - \frac{(\varepsilon_{un,s}^{il} + \varepsilon_{ca}^i) \varepsilon_{un,s}^{il}}{\varepsilon_{un,s}^{il} + E_c \varepsilon_{ca}^i} \quad (2)$$

式中: ε_r^i 为第 i 次由骨架曲线上开始(第一次)卸载后(应力为零时)对应的残余应变; $\varepsilon_{un,s}^{il}$ 与 $\sigma_{un,s}^{il}$ 分别为受压混凝土第 i 次由骨架曲线第一次卸载时初始点的应变和应力; E_c 为混凝土弹性模量,根据文献[2]取值; ε_{ca}^i 为第 i 次由骨架曲线卸载的附加应变,表示为:

$$\varepsilon_{ca}^i = \max\left(\frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_{c0} + \varepsilon_{un,s}^{il}}, \frac{0.09 \varepsilon_{un,s}^{il}}{\varepsilon_{c0}}\right) \cdot \sqrt{\varepsilon_{c0} \varepsilon_{un,s}^{il}} \quad (3)$$

其中 ε_{c0} 为混凝土的峰值压应变,根据文献[2]取值。

需要说明的是,考虑到与加载路径相比,卸载路径更接近于抛物曲线,因此计算每次卸载路径过程

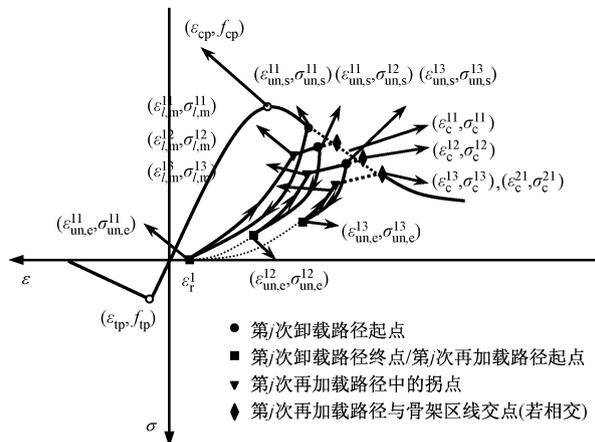


图 2 混凝土反复荷载作用下滞回曲线示意图

中的应力时并未按照我国规范^[2]中所述方法:即先确定如式(4)所示的更新割线刚度 E_r^i 后再计算当前的应力。本文是依据文献^[4],根据当前卸载初始点应力 $\sigma_{un,s}^j$ 、初始点应变 $\varepsilon_{un,s}^j$ 、残余应变 ε_r^i 和当前卸载过程中的应变 ε 四者确定的二次曲线来确定的,计算表达式如式(5)所示。

$$E_r^j = \frac{\sigma_{un,e}^j - \sigma_{un,s}^j}{\varepsilon_{un,e}^j - \varepsilon_{un,s}^j}, \sigma = E_r^i (\varepsilon - \varepsilon_r^i) \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_{un,s}^j \frac{(\varepsilon - \varepsilon_r^i)^2}{(\varepsilon_{un,s}^j - \varepsilon_r^i)^2} \quad (5)$$

式中 $\varepsilon_{un,e}^j$ 和 $\sigma_{un,e}^j$ 分别为次卸载终点(也是再加载的起点)的应变与应力,与 $\varepsilon_{un,s}^j$ 和 $\sigma_{un,s}^j$ 相对应。

(2) 多次反复荷载作用下加载规则

与卸载路径不同,考虑到卸载后再加载路径曲线存在拐点(再加载过程中曲线先表现为凹形曲线而后形状发生变化的点),等应变增量情况下,与单次循环加载相比,多次循环荷载作用下拐点表现相对明显。因此,这里分段考虑加载规则:第一段为二次曲线,第二段为直线。这时,需要具体给出拐点位置的应变和应力,相应的具体规则如下:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{l,m}^j \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{un,e}^j)^2}{(\varepsilon_{l,m}^j - \varepsilon_{un,e}^j)^2} & (\varepsilon \leq \varepsilon_{l,m}^j) \\ E_r^j (\varepsilon - \varepsilon_{l,m}^j) & (\varepsilon > \varepsilon_{l,m}^j) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\varepsilon_{l,m}^j$ 与 $\sigma_{l,m}^j$ 分别为再加载曲线拐点位置的应变和应力; E_r^j 为再加载曲线拐点后卸载直线的斜率。相应的计算分别如下式所示:

$$\varepsilon_{l,m}^j = \varepsilon_r^i + 0.85 (\varepsilon_{un,e}^j - \varepsilon_r^i) \quad (7)$$

$$\sigma_{l,m}^j = \sigma_{un,e}^j + 0.80 (\sigma_{un,s}^j - \sigma_{un,e}^j) \quad (8)$$

$$E_r^j = 0.53 \left(\frac{\sigma_{l,m}^j - \sigma_{un,s}^j}{\varepsilon_{l,m}^j - \varepsilon_{un,s}^j} \right) \quad (9)$$

2 材料动态本构模型

与静荷载作用时的表现相比,钢筋与混凝土在高应变率影响下会呈现出不同的变形行为和力学性质^[5,6]。国内外学者在试验基础上,对考虑应变率效应的钢筋和混凝土本构模型进行了相关研究,例如:国外影响力比较大的 CEB 模型^[7,8],以及国内比较有影响力的林峰模型^[9]和李敏模型^[10,11]。

对于混凝土而言,CEB 模型被公认较为有效。对于钢筋而言,CEB 模型提出虽然较早,但该模型仅是基于一种钢筋强度 ($f_{ys} = 420\text{MPa}$) 试验数据而获得的;林峰模型试验的研究对象是冲击爆炸等高应变率 ($2/\text{s} \leq \dot{\varepsilon} \leq 80/\text{s}$, s 表示秒,下同) 荷载作用下的钢筋本构,随后将应变率下限外延并通过对比进一步说明该模型也适用于应变率 $\dot{\varepsilon} \leq 2/\text{s}$ 范围;李敏

模型是在室内常温下,以 HRB335 和 HRB400 共 98 根钢筋为样本,考虑地震作用的应变率范围 ($2.5 \times 10^{-4}/\text{s} \leq \dot{\varepsilon} \leq 10^{-1}/\text{s}$)^[5,6],并通过三种加载方式(单调拉伸、常幅值循环和变幅值循环)的试验数据而得到的。李敏模型有如下优点:与 CEB 模型相比,不仅适用于我国相关要求(钢筋化学成分与加工工艺要求不同于 CEB 模型),而且样本更加丰富,因此适用范围更广;此外,李敏模型给出了动态与静态强度指标的比值(即动力提高系数),强调了考虑应变率的钢筋屈服强度不仅提高了 10.5% ~ 22.5%,而且屈服平台长度也随之变大,同时李敏模型通过动力提高系数可以将动力作用下的本构模型与静力作用下本构模型直接联系起来使得模型表达形式十分简洁,因此可便于工程直接应用。此外,应该指出:文献^[9]对 HRB400 钢筋进行了不同高应变率作用下的本构模型研究,也得到了动载作用下 III 级钢筋屈服强度与静力作用下相比有显著提高的结论(提高 23.31%),但是文中未给出本构的具体表达式。

通过以上对比分析,本文中的钢与混凝土材料分别采用李敏模型和 CEB 模型。

2.1 钢材材料动态本构模型

李敏模型中是以动力提高系数(动态特征参数与准静态特征参数的比值)作为因变量并以当前应变率与准静态应变率比值作为自变量建立函数,并由此来描述动态本构模型的。具体如下:

$$f_{yd}/f_{ys} = 1 + c_y \lg(\dot{\varepsilon}_s/\dot{\varepsilon}_{s0})$$

$$(c_y = 0.1709 - 3.289 \times 10^{-4} f_{ys}) \quad (10)$$

$$f_{ud}/f_{us} = 1 + c_u \lg(\dot{\varepsilon}_s/\dot{\varepsilon}_{s0})$$

$$(c_u = 0.02738 - 2.982 \times 10^{-5} f_{ys}) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{hd}/\varepsilon_{hs} = 1 + c_h \lg(\dot{\varepsilon}_s/\dot{\varepsilon}_{s0})$$

$$(c_h = 0.9324 - 0.00212 f_{ys}) \quad (12)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_s$ 和 $\dot{\varepsilon}_{s0}$ 分别为当前应变率和准静态应变率 ($2.5 \times 10^{-4}/\text{s}$) 的量值; f_{yd} 和 f_{ys} 分别为动态和静态屈服强度,在物理意义上, f_{ys} 与图 1 中参数 f_y 相同; f_{ud} 和 f_{us} 分别为动态和静态抗拉极限强度(即抗拉强度); ε_{hd} 和 ε_{hs} 分别为动态和静态的强化阶段起始应变, ε_{hs} 与图 1 中参数 $k_1 \varepsilon_y$ 物理意义相同; c_y , c_u 和 c_h 分别为相应动态本构的模型参数。

2.2 混凝土动态本构模型

CEB^[9]规范中也是通过动态与静态本构特征参数的比值作为因变量,并以当前应变率与准静态应变率比值作为自变量建立函数,由此来描述动态本构模型的。具体如下:

混凝土动态抗压本构:

$$f_{cd}/f_{c0} = \begin{cases} (\dot{\varepsilon}_c/\dot{\varepsilon}_{c0})^{1.026\alpha_s} & (|\dot{\varepsilon}_c| \leq 30s^{-1}) \\ \gamma_s (\dot{\varepsilon}_c/\dot{\varepsilon}_{c0})^{1/3} & (|\dot{\varepsilon}_c| > 30s^{-1}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\alpha_s = \frac{1}{5 + 9(f_{cm}/f_{cm0})}, \quad f_{cm0} = 10\text{MPa} \quad (14)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f, \quad \Delta f = 8\text{MPa} \quad (15)$$

$$\lg\gamma_s = 6.156\alpha_s - 2 \quad (16)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_c$ 和 $\dot{\varepsilon}_{c0}$ 分别为当前应变率和准静态应变率 ($3.0 \times 10^{-5}/s$) 的量值; f_{cd} 和 f_{c0} 分别为混凝土在动态与静态作用下的抗压强度, 在物理意义上, f_{c0} 与图2中的 f_{cp} 相同; f_{ck} 为抗压强度标准值。

混凝土动态抗拉本构:

$$f_{td}/f_{t0} = \begin{cases} (\dot{\varepsilon}_c/\dot{\varepsilon}_{c0})^{1.016\delta_s} & (|\dot{\varepsilon}_c| \leq 30s^{-1}) \\ \beta_s (\dot{\varepsilon}_c/\dot{\varepsilon}_{c0})^{1/3} & (|\dot{\varepsilon}_c| > 30s^{-1}) \end{cases} \quad (17)$$

$$\delta_s = \frac{1}{10 + 6(f_{cm}/f_{cm0})} \quad (18)$$

$$\lg\beta_s = 7.112\delta_s - 2.33 \quad (19)$$

式中: f_{td} 和 f_{t0} 分别为混凝土在动态与静态作用下的抗压强度, f_{t0} 与图2中的 f_{tp} 物理意义相同。

容易看出,由式(13)和式(17),可进一步得到:

$$\frac{f_{td}}{f_{cd}} = \begin{cases} \frac{f_{t0}}{f_{c0}} \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}_c}{\dot{\varepsilon}_{c0}}\right)^{1.016\delta_s - 1.026\alpha_s} & (|\dot{\varepsilon}_c| \leq 30s^{-1}) \\ \frac{\beta_s}{\gamma_s} \cdot \frac{f_{t0}}{f_{c0}} \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}_c}{\dot{\varepsilon}_{c0}}\right)^{1.016\delta_s - 1.026\alpha_s} & (|\dot{\varepsilon}_c| > 30s^{-1}) \end{cases} \quad (20)$$

3 纤维梁模型原理简述

这里采用纤维梁模型模拟压弯延性破坏作为控制破坏形式的梁柱单元,即考虑截面绕中性轴两个方向的弯曲变形和垂直于截面方向的拉压变形。这时,在微观层面上需要将纤维的应力和截面变形(曲率、轴向应变)联系起来,在宏观层面上将截面的内力(弯矩、轴力)和截面变形联系起来。所建立的关系中将用到各纤维材料的弹性模量,这取决于本构模型,也是对材料非线性的直接体现。图3为可用来模拟结构梁、柱构件的梁柱单元、截面及其纤维的示意图。

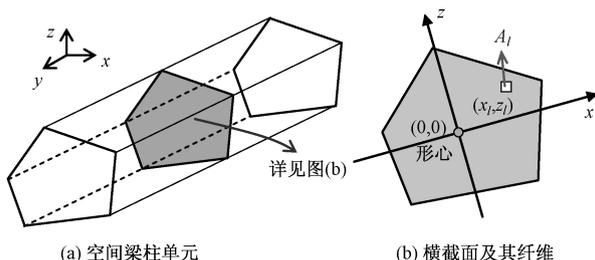


图3 任意截面形状的空间梁柱单元、横截面及其纤维示意

考虑梁截面设置了 m 个纤维。这时基于平截面假定,截面纤维应变向量可通过截面曲率 φ_x, φ_y (符合右手螺旋定则) 和轴向应变 ε_y (拉正压负) 来表示,即:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon(x_1, y_1, z_1) \\ \vdots \\ \varepsilon(x_l, y_l, z_l) \\ \vdots \\ \varepsilon(x_m, y_m, z_m) \end{bmatrix} = \mathbf{N}\boldsymbol{\delta},$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} z_1 & 1 & -x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_l & 1 & -x_l \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_m & 1 & -x_m \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varepsilon_y \\ \varphi_z \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中 x_l, y_l 和 z_l 为第 l 个纤维的坐标。

这时,截面纤维的应力向量可通过内积形式表示为:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1 \cdots \sigma_l \cdots \sigma_m]^T = \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \quad (22)$$

式中 $\mathbf{E} = [E_1 \cdots E_l \cdots E_m]^T$, 其中向量元素 E_l 为第 l 个纤维材料的弹性模量,与选定或定义的应力、应变关系有关。

这时根据有限元和力学知识,截面的内力向量可表示为:

$$\mathbf{F} = [M_x, N_y, M_z]^T = \mathbf{N}^T \mathbf{E} \cdot \mathbf{N} \boldsymbol{\delta} \cdot \mathbf{A} \quad (23)$$

式中 $\mathbf{A} = [A_1 \cdots A_l \cdots A_m]^T$, 其向量元素 A_l 表示第 l 个纤维材料的截面面积,如图3(b)所示。

4 考虑应变率效应的子程序开发

MSC. MARC 主程序具有便于用户开发的子程序接口 UBEAM,用户可通过该接口并按照程序相关规则编制子程序,并与主程序对接。理论上分析,传入至 UBEAM 的关键参数主要是应变,应变的计算需要首先计算出节点位移增量,节点位移增量需要用户给定初始荷载和初始刚度矩阵(对于压弯延性破坏为主要形式的构件,刚度矩阵参数为 EA, EI_{xx} 和 EI_{yy} , 这些参数越接近实际参数量值迭代次数就越少,计算也越快)。相应的流程如图4所示,本文内容主要涉及到应变率效应的本构子程序开发。

5 子程序的试验验证

以文献[10]中非等幅循环加载作用下剪跨比 $\lambda = 5.5$ 的试验构件 B30 (混凝土强度等级 C30) 为例,对如上考虑应变率效应的子程序进行验证。相应构件的几何参数、材料参数、加载方案(三点加载)以及非等幅循环加载历程可参考文献[10]。

首先采用 SAP2000 建立有限元模型,模型与相

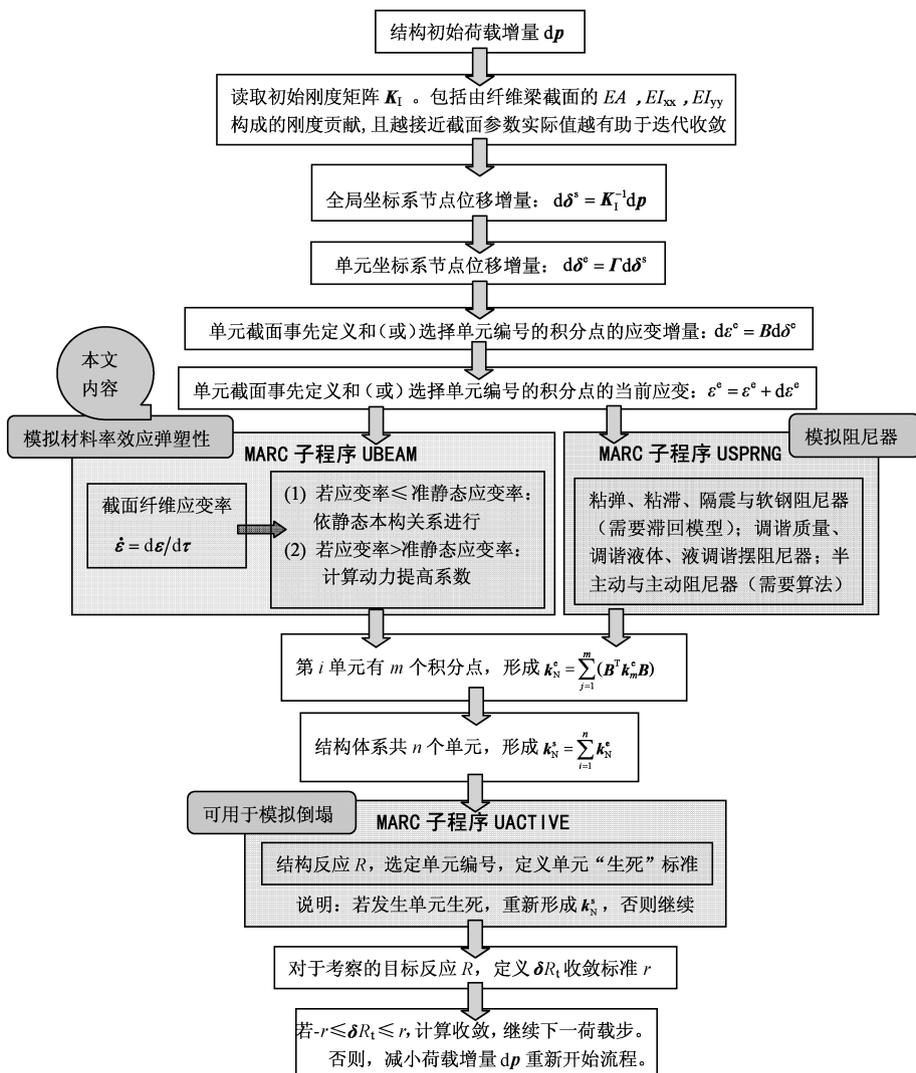


图4 基于 MSC.MARC 用户子程序流程

关说明如图 5 所示。然后,通过文献[13]开发的 SAP2MARC 程序接口导入图 6 所示的 MSC.MARC 模型,包括箍筋约束效应的材料数据通过文献[1]中开发的 UMAT 程序直接生成。应该说明的是, MSC.MARC 主程序对于 calculated 方式定义的 Beam 52 单元,当前无法显示其有限元模型的拉伸图。与文献[10]中的试验相对应:加载方式采用位移控制加载,加载速率分别为 0.05mm/s 和 30mm/s。本文反复加载 6 周,加载历程如图 7 所示。加载点的位移历程与支座竖向约束反力的关系如图 8 所示。图 8(a)和图 8(b)中分别给出了数值模拟与试验(相应试验数据由文献[10]作者李敏博

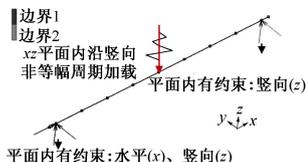
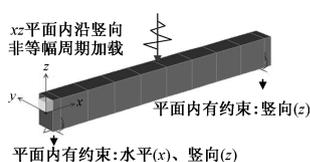
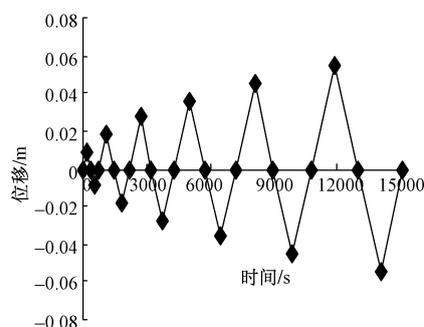


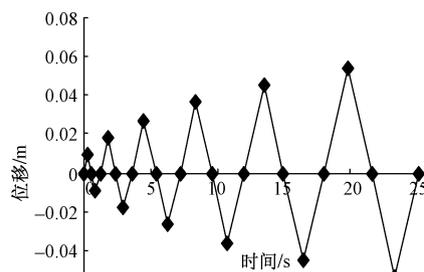
图5 SAP2000 有限元模型与说明 图6 MSC.MARC 有限元模型与说明

士提供)的结果。由结果可以看出:考虑应变率效应的模拟结果与试验结果的符合度令人满意,验证了程序的有效性和可靠性。

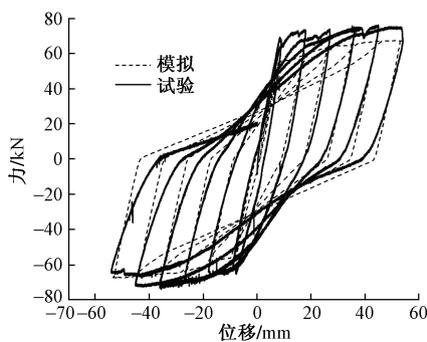
对比图 8(a)和图 8(b)还可以看出,与 0.05mm/s 加载速率的工况相比,30mm/s 加载速率工况下支座竖向约束反力更大,这一点体现了程序中应变率效应对应力提高系数的贡献。该结果与上述的理论模型相一致。事实上,通过对比图 9(a)和图 9(b)分别给出的试验和数值模拟可容易看出这一结果。与 0.05mm/s 加载速率工况下支座竖向的最大约束反力相比,30mm/s 加载速率工况下结果有 9.3% 的增幅。结合理论分析:当激励输入的卓越周期接近结构主振型周期时,更容易发生共振,此时因输入的速率变化而导致材料应变率变化会更加明显,进而应变率对结构的影响也会随之相对显著。此外,应变率效应对于重要构件的影响可直接影响构件进入塑性的先后顺序,进而影响部分甚至整体



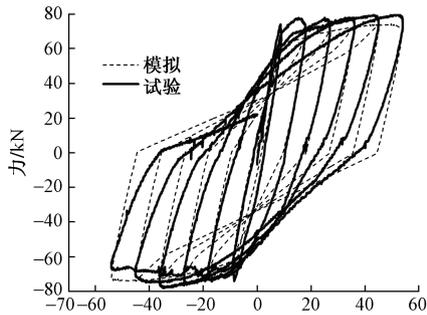
(a) 加载速率0.05mm/s



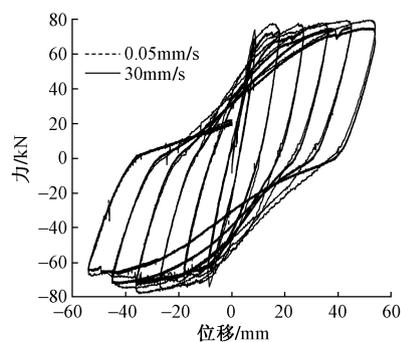
(b) 加载速率30mm/s



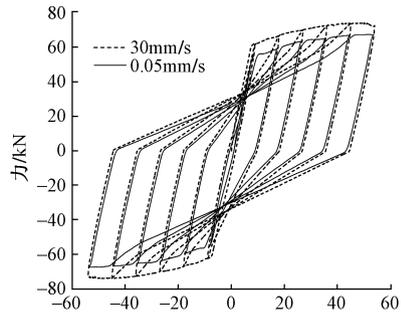
(a) 加载速率0.05mm/s



(b) 加载速率30mm/s



(a) 试验结果



(b) 数值模拟结果

图7 非等幅值位移加载历程

图8 不同加载速率下的试验与数值模拟结果对比

图9 不同加载速率工况下结果对比

结构的倒塌路径,最终影响研究人员对结构抗震性能的判断和评估(相关的具体研究结果将在今后的文章中给出)。因此,无论是从科学分析还是全面考虑的角度而言,本文都建议在结构的动力弹塑性甚至倒塌分析中考虑应变率对结果的影响。

6 结语

(1) 改进并给出了混凝土滞回曲线中的卸载后再加载路径的规则,编制了材料动态本构的 MSC. MARC 子程序。

(2) 采用编制的动态本构模型的 MSC. MARC 子程序对已有文献中试验进行数值模拟,模拟结果与试验数据符合度很好,验证了动态本构模型的 MSC. MARC 子程序的可靠性和准确性。

(3) 通过试验结果、数值模拟并结合理论分析,建议在结构的动力弹塑性分析和倒塌分析中需要考虑应变率对结果的影响,由此可提高分析问题的科学性和考虑因素的全面性。

参考文献

- [1] 柳国环,陆新征. 大跨、高层结构动力弹塑性和倒塌分析(II):纤维程序 UMAT 原理与开发[J]. 建筑结构,2014,44(4):88-93.
- [2] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [3] 汪训流. 配置高强钢丝无粘结钢筋混凝土柱复位性能的研究[D]. 北京:清华大学,2007.
- [4] 聂建国,陶慕轩. 采用纤维梁单元分析钢-混凝土组合

结构地震反应的原理[J]. 建筑结构学报,2011,32(10):1-10.

- [5] WAKABAYASHI M, NAKAMURA T, IWAI S, et al. Effect of strain rate on the behavior of structural members subjected to earthquake force [C]// Proceeding of 8th World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco,1984:491-498.
- [6] SHING P S B, MAHIN S A. Rate-of-loading effects on pseudo dynamic tests [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114 (11) : 2403-2420.
- [7] EIBL J. Concrete structures under impact and impulsive loading [R]. Dubrovnik: Comite Euro-International du Beton, 1988.
- [8] COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB-FIP model code 1990 [S]. Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire, Great Britain,1990.
- [9] 林峰,顾祥林,匡昕昕,等. 高应变率下建筑钢筋的本构模型[J]. 建筑材料学报,2008,11(1):14-20.
- [10] 李敏. 材料的率相关性对钢筋混凝土结构动力性能的影响[D]. 大连:大连理工大学,2012.
- [11] 李敏,李宏男. 建筑钢筋动态试验及本构模型[J]. 土木工程学报,2010,43(4):70-75.
- [12] 范俊奇,高永红,楼梦麟,等. 新Ⅲ级钢筋动力性能及在抗震抗爆结构中应用试验研究[C]//第八届全国工程结构安全防护学术会议. 2011:406-412.
- [13] 柳国环,陆新征,于秀雷,等. 大跨、高层结构动力弹塑性和倒塌分析(III):SAP2MARC 和 MARCPOST 技术开发与应用[J]. 建筑结构,2014,44(4):94-101.